

А. НЕМАХ, Д. Ф. ДОНСЬКИЙ, С. В. НЕСТЕРЕНКО

ПОБУДОВА РЕГРЕСІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНКИ ЗАХИСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ В АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ НАФТОВИХ РОДОВИЩ ІРАКУ

Тампонажні композиції на основі портландцементу марки G , які, як правило, застосовуються для кріплення обсадних колон на родовищах Іраку, недостатньо захищають матеріал обсадних колон від існуючих факторів корозії: температури, ступеня мінералізації розчину, вмісту сірководню і вуглекислого газу. Нами запропонований комплексний підхід для вирішення цієї складної проблеми. Пропонується використання нових конструкційних матеріалів – аустенітно-феритних сталей в поєднанні з тампонажними композиціями з поліпшеними властивостями за рахунок аміновмісних домішок. Отримані рівняння регресії для швидкості корозії для сталей Ст45 і SAF 2507 в залежності від різних агресивних факторів середовища: солемісту, температури, вмісту CO_2 та вмісту H_2S , проведений їх дисперсійний і графічний аналізи.

Ключові слова: портландцемент, обсадна колона, температура, ступінь мінералізації, сірководень, вуглекислий газ, вуглецева сталь, аустенітна сталь, рівняння регресії, швидкість корозії, дисперсійний аналіз, графічний аналіз.

А. НЕМАХ, Д. Ф. ДОНСКОЙ, С. В. НЕСТЕРЕНКО

ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ИРАКА

Тампонажные композиции на основе портландцемента марки G , которые, как правило, применяются для крепления обсадных колонн на месторождениях Ирака, недостаточно защищают материал обсадных колонн от существующих факторов коррозии: температуры, степени минерализации раствора, содержания сероводорода и углекислого газа. Нами предложен комплексный подход для решения этой сложной проблемы. Предлагается использование новых конструкционных материалов – аустенитно-ферритных сталей в сочетании с тампонажными композициями с улучшенными свойствами за счет аминосодержащих добавок. Получены уравнения регрессии для скорости коррозии для сталей Ст45 и SAF 2507 при действии различных агрессивных факторов среды: солесодержания, температуры, содержания CO_2 и содержания H_2S , проведен их дисперсионный и графический анализы.

Ключевые слова: портландцемент, обсадная колонна, температура, степень минерализации, сероводород, углекислый газ, углеродистая сталь, аустенитно-ферритная сталь, уравнение регрессии, скорость коррозии, дисперсионный анализ, графический анализ.

A. NEAMAH, D. F. DONSKY, S. V. NESTERENKO

DESIGNING REGRESSION MODEL FOR ESTIMATING PROTECTION PROPERTIES OF CEMENT STONE IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS OF IRAQI OIL DEPOSITS

The type G Portland cement based grouting mixtures, which are typically used to secure casing columns at Iraq oil deposits, do not sufficiently protect the casing material from existing corrosion factors, such as temperature, solution mineralization, hydrogen sulphide and carbon dioxide content. We propose a comprehensive approach to address this complex problem. It is proposed to use new construction materials, namely austenitic steels in combination with new grouting mixture with improved properties due to amine-containing additives. The regression equation for the corrosion rate for steels St45 and SAF 2507 is obtained, depending on various aggressive factors, such as salt content, temperature, CO_2 and H_2S content, and its dispersion and graphical analyzes is carried out.

Key words: Portland cement, casing, temperature, degree of mineralization, hydrogen sulphide, carbon dioxide, carbon steel, austenitic steel, regression equation, corrosion rate, dispersion analysis, graphical analysis.

Вступ. В даний час в світі зростає частка нафтогазових родовищ, які потребують підвищених витрат на їх розробку і освоєння. Одним з істотних джерел підвищення обсягів видобутку нафти для Іраку є розробка родовищ зі складними гірничо-геологічними умовами будівництва свердловин (високі пластові тиски, наявність в пластовій воді з підвищеним солемістом кислих агресивних компонентів – сірководню в поєднанні з вуглекислим газом). Це вимагає якісно нового підходу до їх цементування, що супроводжується рядом ускладнень в розробці нових композицій [1].

Постановка задачі. Застосування захисних покриттів поверхні обсадних труб малоефективне, тому що в процесі *спуско-підйомних операцій* і цементування відбувається порушення цілісності захисного шару.

У зв'язку з цим особливо актуальним є *комплексний підхід* до вирішення проблеми, а саме – *розробка способів модифікації цементного каменю*, що знаходиться в безпосередньому контакті з поверхнею обсадної колони, і надання цементному кільцю властивостей, що знижують інтенсивність корозійних процесів кріплення свердловин, а також застосування нових перспективних марок сталей, якими є *аустенітно-феритні сталі* [2, 3].

Аналіз попередніх розробок. У загальному комплексі робіт зі спорудження та підтримки роботоспроможності свердловин значний обсяг займають процеси роз'єднання пластів. У зв'язку з цим одним з напрямків є створення *ізоляційного комплексу*, в тому числі і цементного кільця, що дозволяє забезпечити тривалу безперебійну експлуатацію свердловин. Основне призначення цементування – якісне роз'єднання пластів, при якому забезпечується надійна ізоляція продуктивної частини розрізу свердловини і окремих прошарків в багатопластовому покладі, створення міцного кріплення і захисту її обладнання від корозійного впливу агресивних середовищ, які є характерними для багатьох нафтових родовищ Іраку і мають схожі гірничо-геологічні умови і гід-

© А. Немах, Д. Ф. Донський, С. В. Нестеренко, 2020

рогеологічний режим [4 – 8].

Після цементування і заміщення бурового розчину *тампонажним* виникає безліч проблем, пов'язаних з фізико-механічними властивостями розчину і каменю. До цементного кільця пред'являються вимоги, які важко здійснити одночасно. З одного боку, цементний камінь повинен служити *флюїдоізоляційним бар'єром* між поглинаючими і проявляючими пластами, а з іншого – пов'язувати обсадні колони і гірські породи в жорстку складову конструкцію. При цьому, як в процесі цементування, так і в період експлуатації свердловин існує безліч невирішених проблем. Поряд з технологічними факторами, важливу роль з точки зору якісного цементування грає правильний вибір тампонажного матеріалу, який повинен відповідати цілому комплексу вимог щодо забезпечення надійного кріплення свердловин.

При виборі рецептур тампонажних матеріалів для кріплення свердловин в корозійно-активних середовищах зазвичай не враховується можливість зміни ізоляційних властивостей каменю в часі. Цементний камінь, що забезпечує герметичність кріплення свердловин в першу добу тверднення, після тривалого впливу агресивних середовищ може повністю втратити свої ізоляційні властивості. Особливо небезпечні міжпластові перетоки і прояви флюїдів, що містять хімічно активні і токсичні компоненти, такі як: сірководень, вуглекислий газ, високомінералізовані розчини солей магнію і кальцію, які є агресивними по відношенню як до матеріалу обсадної колони так і до цементного кільця.

На даний момент існує потреба в науковому обґрунтуванні для прийняття рішення щодо створення та застосування тампонажних систем, де їх переваги виявлялися б найбільшою мірою. Одним з найбільш важливих завдань сьогодні, що стоять перед розробниками нафтових і газових свердловин, є охорона надр за рахунок забезпечення довговічності кріплення свердловин в регіонах, що містять пластові флюїди, агресивні по відношенню до цементного каменю. Підвищення якості кріплення свердловин в цих умовах може бути забезпечено створенням нових рецептур корозійностійких тампонажних матеріалів з поліпшеними технологічними показниками в поєднанні з перспективними конструкційними сталлями.

Аналіз стану фонду свердловин Іраку показав, що основними причинами виходу свердловин з ладу є відсутність тампонажних систем, що відповідають умовам їх застосування. Незважаючи на широкий спектр тампонажних матеріалів, вибір таких в умовах Іраку досить обмежений, що зумовлює використання портландцементу марки G для облаштування більшості свердловин. Застосовувані в даний час тампонажні матеріали на шлаковій основі відрізняються підвищеною стійкістю до дії сірководню в порівнянні з портландцементами, але асортимент їх дуже малий. Крім того, шлакові цементи не здатні запобігти сірководневій корозії поверхні обсадних труб через свій хіміко-мінералогічний склад.

Високі концентрації сірководню і вуглекислого газу обумовлюють значний ступінь агресивного впливу цих газів не тільки на цементне кільце, але і на обсадні колони, як правило, виготовлені зі сталей, що мають невисоку корозійну стійкість.

Поверхнева корозія обсадних колон викликається за рахунок проникнення сірководню через капілярно-пористу структуру цементного каменю, що виконує роль дифузійного бар'єру для проникнення пластових флюїдів, або через наявність дефектів при неякісному цементуванні (табл. 1) [9].

Таблиця 1 – Аналіз причин негерметичності заколонного простору

Причини негерметичності заколонного простору	Властивості цементного розчину і каменю, відповідальні за прояв негерметичності
1. Незаповнення заколонного простору цементним розчином.	Висока в'язкість цементного розчину і погане витіснення ним бурового розчину.
2. Корозійне руйнування цементного каменю пластовими флюїдами.	Низька стійкість структури цементного каменю, яка збільшується з його проникністю.
3. Поява тріщин в цементному камені при його перфорації.	Велика крихкість, низька тріщиностійкість цементного каменю.
4. Дегідратація глиняної кірки цементним розчином, що набирає міцність, і цементним каменем, втрата контакту між цементним каменем і стінкою камери.	Властиві цементному каменю. Контракційні явища.
5. Відхід цементного каменю від обсадної колони.	Відсутність адгезії цементного каменю до труби.
6. Поява дуже міцного високопроникного цементного каменю навпроти пористих пластів з низьким пластовим тиском.	Висока фільтровіддача цементного розчину, залежність міцності цементного каменю від водоцементного співвідношення вихідного розчину.
7. Руйнування цементного каменю гідростатичним напором пластів.	Неможливість забезпечення високої міцності цементного каменю через необхідність закачувати цементний розчин з високим водоцементним співвідношенням і його розведенням пластовими флюїдами.
8. Руйнування слабозцементованих порід в привибійній зоні.	Неможливість створення міцного цементного каменю з проникністю 1 мкм^2 і більш.
9. Руйнування цементного каменю, що знаходиться проти водонасичених пластів за рахунок осмотичного підсосу пластової води.	Наявність проникності каменю до $0,05 \text{ мкм}^2$ призводить до руйнування каменю на мікрорівні і подальшому зростанню його проникності.

Порушення герметичності кріплення свердловин в результаті зміни структури цементного каменю і його руйнування, а також корозійного пошкодження колон призводять до ускладнень, зокрема виникають заколонні газопроявлення і міжпластові перетоки. Це є неприпустимим з позицій промислової та екологічної безпеки експлуатації сірководневих родовищ.

Аналіз існуючих методів досліджень цементного каменю в агресивних середовищах [10 – 21] показує, що проведення таких випробувань в натурних умовах пов'язано з низкою труднощів і тому актуальним є створення експресних лабораторних методик випробувань на корозійну стійкість цементного каменю, що дозволяють моделювати *термобаричні умови свердловин*, а саме: концентрацію агресивних газів і склад пластових флюїдів [22 – 24].

Метою дослідження було вивчення в лабораторних умовах впливу складу тампонажних композицій на основі існуючих рецептур з використанням *портландцементу марки G* з домішками на основі аміновмісних сполук для підвищення їх захисних властивостей в контакт з різними зразками сталей у високо мінералізованих середовищах з високою концентрацією сірководню і вуглекислого газу, що є характерним для Іраку.

Об'єкт дослідження – цементний камінь з тампонажних матеріалів, що застосовуються для будівництва свердловин в Іраку – *портландцементу марки G*.

Предмет дослідження – моделювання корозійних процесів у різних сталях в залежності від ряду факторів, а саме: температури, ступеня мінералізації розчину, вмісту сірководню і вуглекислого газу.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до мети даної роботи дослідження було спрямоване на рішення основного завдання, а саме: оцінку корозійно-захисних властивостей тампонажних сумішей, отриманих на основі портландцементу марки *G*, для сталей марок Ст45 (аналог сталі K55) [22] і SAF2507 по відношенню до агресивних флюїдів нафтового пласту. Експериментальні досліді проводили на лабораторній установці у вигляді автоклаву, в якому моделювались рівні різних факторів, граничні значення яких були вибрані з реальних умов кількох свердловин *іракського родовища Мішріф* [25].

Математична модель. В якості цільової функції була вибрана швидкість корозії ($\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$). Інтервали варіювання факторів в плані-матриці для проведення експерименту були вибрані на основі промислових даних (табл. 2).

Таблиця 2 – Фактори експерименту та їх рівні

Фактор	Код фактору	Одиниця виміру	Рівні факторів				
			-2	-1	0	+1	+2
Солевміст	A	$\text{г}/\text{дм}^3$	20	40	80	120	160
Температура	B	$^{\circ}\text{C}$	50	65	80	95	110
Вміст CO_2	C	%	0,1	1,1	2,1	3,1	4,1
Вміст H_2S	D	%	0,02	0,62	1,22	1,82	2,42

В загальному вигляді швидкість корозії є функцією цих факторів, які можна вважати незалежними (1):

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, x_4). \quad (1)$$

В нашому випадку $Y = V_i$, де $i = 1$ або 2 – це швидкість корозії, V_1 , відповідно, для сталі SAF2507 (модель 1) і V_2 – для сталі Ст45 (модель 2); x_1, x_2, x_3, x_4 відповідають факторам A, B, C, D в табл. 2.

Кодування факторів проводилося для переведення натуральних значень факторів в безрозмірні величини. Це забезпечує можливість порівняльної оцінки впливу на процес різних параметрів незалежно від їх розмірності, а також дозволяє побудувати стандартну ортогональну план-матрицю експерименту.

Зв'язок між кодованим і натуральним виразом фактора задається формулою:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (2)$$

де x_i – кодований вираз i -го фактора; X_i – натуральне значення фактора; X_{i0} – значення i -го фактора на нульовому рівні; ΔX_i – інтервал варіювання i -го фактора.

В якості нульового рівня факторів зазвичай вибирають центр інтервалу, який відповідає середньозваженим значенням факторів для промислових умов свердловин нафтових родовищ Іраку при існуючих технологічних режимах [22].

Серед центрально-композиційних планів другого порядку найбільшого поширення набули ротатабельні плани. Ці плани дають можливість передбачати значення *функції відгуку з дисперсією (точністю)*, однаковою на рівних відстанях від центру плану (по всьому факторному простору). При цьому функція відгуків апроксимо-

вана поліномом другого порядку виду:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \sum_{i \neq j}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (3)$$

де n – число незалежних змінних.

Для планування експерименту застосовували центрально-композиційний ротатабельний план другого порядку (табл. 3), який було доповнено *зоряними точками*. Обробка результатів експерименту та аналіз регресійної моделі здійснено за допомогою модуля «Планування експерименту» статистичної програми Statgraphics 5.0 Plus.

Таблиця 3 – План-матриця для проведення експерименту та отримані значення швидкості корозії ($\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$) для вибраних зразків сталі

Значення факторів				Показник швидкості корозії, $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	
A	B	C	D	V_1 (SAF2507)	V_2 (Ст 45)
-1	-1	-1	-1	0,007	0,017
1	-1	-1	-1	0,01	0,014
-1	1	-1	-1	0,022	0,042
1	1	-1	-1	0,033	0,083
-1	-1	1	-1	0,0062	0,0092
1	-1	1	-1	0,01	0,014
-1	1	1	-1	0,01	0,0104
1	1	1	-1	0,014	0,0147
-1	-1	-1	1	0,007	0,011
1	-1	-1	1	0,014	0,014
-1	1	-1	1	0,016	0,084
1	1	-1	1	0,011	0,168
-1	-1	1	1	0,011	0,011
1	-1	1	1	0,017	0,017
-1	1	1	1	0,018	0,183
1	1	1	1	0,024	0,21
-2	0	0	0	0,016	0,018
2	0	0	0	0,018	0,066
0	-2	0	0	0,007	0,024
0	2	0	0	0,025	0,14
0	0	-2	0	0,015	0,02
0	0	2	0	0,018	0,068
0	0	0	-2	0,022	0,016
0	0	0	2	0,025	0,07
0	0	0	0	0,022	0,042
0	0	0	0	0,021	0,041

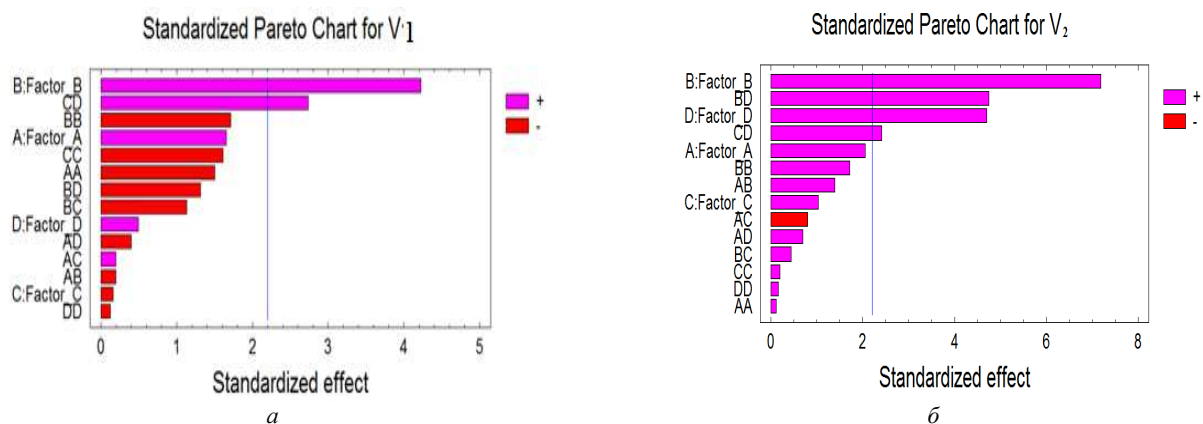


Рис. 1 – Оцінка значимості коефіцієнтів отриманих моделей: a – модель 1; b – модель 2.

В результаті обробки приведених даних в програмі Statgraphics були отримані рівняння регресії, проведений дисперсійний та графічний аналізи [26]. Результати аналізу показані в табл. 4 та рис. 1 і рис. 2. Аналіз регресійних рівнянь показує, що є певний зв'язок між швидкістю корозії V_1 для сталі SAF2507 (модель 1) і V_2 для

сталі Ст45 (модель 2) та обраними факторами впливу: солевмістом (A), температурою (B), вмістом CO_2 (C) та вмістом H_2S (D). Коефіцієнти моделі наведено у нормованому (кодованому) вигляді.

Таблиця 4 – Результати дисперсійного аналізу отриманих математичних моделей в програмі Statgraphics

Модель 1 V_1 (SAF2507)	Модель 2 V_2 (Ст45)
$V_1 = 0,0215 + 0,00165833*Factor_A + 0,00424167*Factor_B - 0,000158333*Factor_C + 0,000491667*Factor_D - 0,00176875*Factor_A^2 - 0,0002375*Factor_A*Factor_B + 0,0002375*Factor_A*Factor_C - 0,0004875*Factor_A*Factor_D - 0,00201875*Factor_B^2 - 0,0013875*Factor_B*Factor_C - 0,0016125*Factor_B*Factor_D - 0,00189375*Factor_C^2 + 0,0033625*Factor_C*Factor_D - 0,00014375*Factor_D^2$	$V_2 = 0,0415 + 0,0109625*Factor_A + 0,0383292*Factor_B + 0,0055125*Factor_C + 0,0250708*Factor_D + 0,000732292*Factor_A^2 + 0,00909375*Factor_A*Factor_B - 0,00518125*Factor_A*Factor_C + 0,00455625*Factor_A*Factor_D + 0,0107323*Factor_B^2 + 0,00286875*Factor_B*Factor_C + 0,0310063*Factor_B*Factor_D + 0,00123229*Factor_C^2 + 0,0157313*Factor_C*Factor_D + 0,000982292*Factor_D^2$
R-squared = 77,1667 percent R-squared (adjusted for d.f.) = 48,1062 percent Standard Error of Est. = 0,00492104 Mean absolute error = 0,00264551 Durbin-Watson statistic = 1,04223 (P=0,0007) Lag 1 residual autocorrelation = 0,468342	R-squared = 91.2429 percent R-squared (adjusted for d.f.) = 80.0975 percent Standard Error of Est. = 0,026112 Mean absolute error = 0,0149119 Durbin-Watson statistic = 2.24685 (P=0,095) Lag 1 residual autocorrelation = -0,141324

Для першої моделі коефіцієнт детермінації R – квадрат дорівнює 77.1, для другої – 91.24, що, в цілому, підтверджує адекватність отриманих моделей. Значимість коефіцієнтів моделі визначалася за допомогою P – рівня і наведена на *стандартизованому Парето-графіку* (рис. 1). Вертикальна лінія на рис. 1 відповідає 95 % статистичній значущості коефіцієнтів.

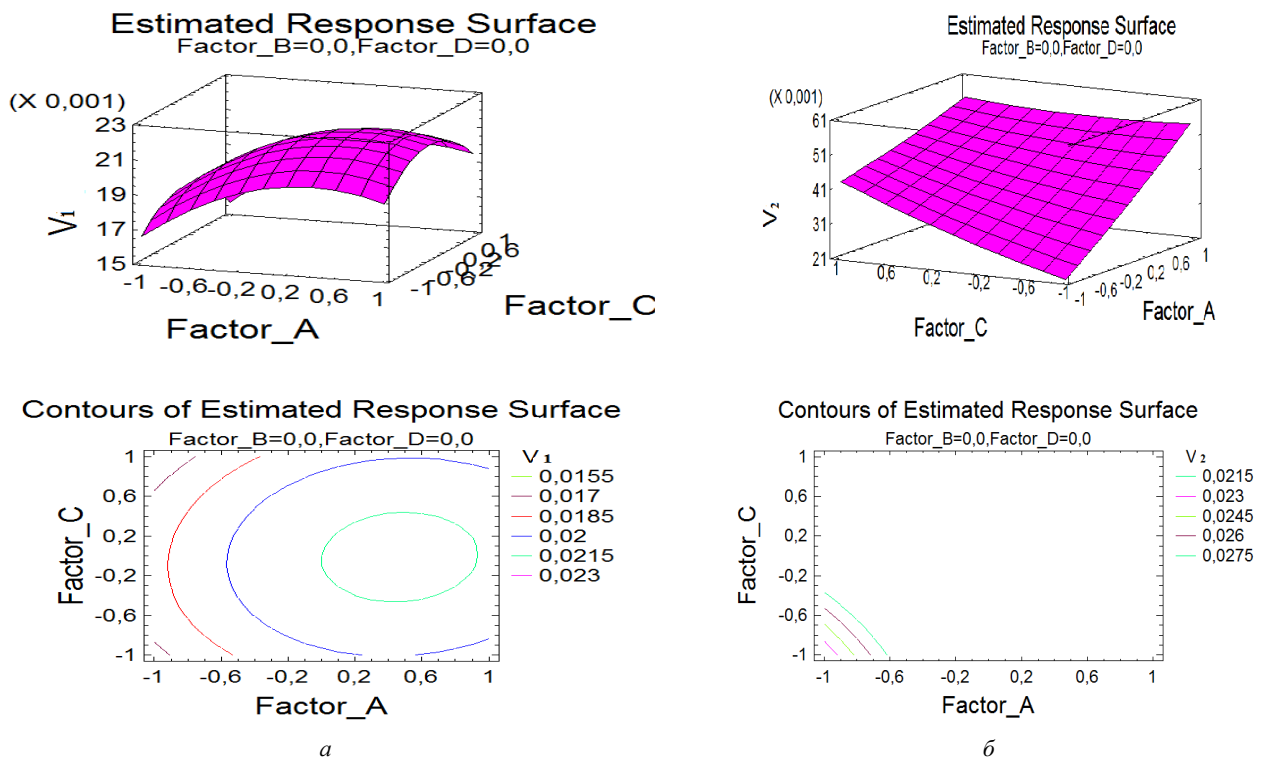


Рис. 2 – Порівняльний графічний аналіз отриманих моделей: а – тривимірний графік залежності швидкості корозії для сталі SAF2507 під шаром цементного покриття $V_1 = f(A, C)$ та контурний графік поверхні відгуку для факторів А і С;

б – тривимірний графік залежності швидкості корозії для сталі Ст45 під шаром цементного покриття $V_2 = f(A, C)$ та контурний графік поверхні відгуку для факторів А і С.

При порівнянні отриманих регресійних рівнянь встановлено, що в обох випадках на першому місці стоїть фактор (B) – температура, що є цілком логічно з точки зору її впливу на розвиток будь-якого хімічного процесу, в тому числі, корозії. Також для обох моделей (швидкість корозії зразків сталі V_1 для сталі SAF2507 (модель 1) і V_2 для сталі Ст45 (модель 2)) спостерігається сумісний вплив факторів (C) – вміст CO_2 та (D) – вміст H_2S , що

говорить про взаємопов'язаність їх дії на розвиток процесів корозії для обох зразків сталі.

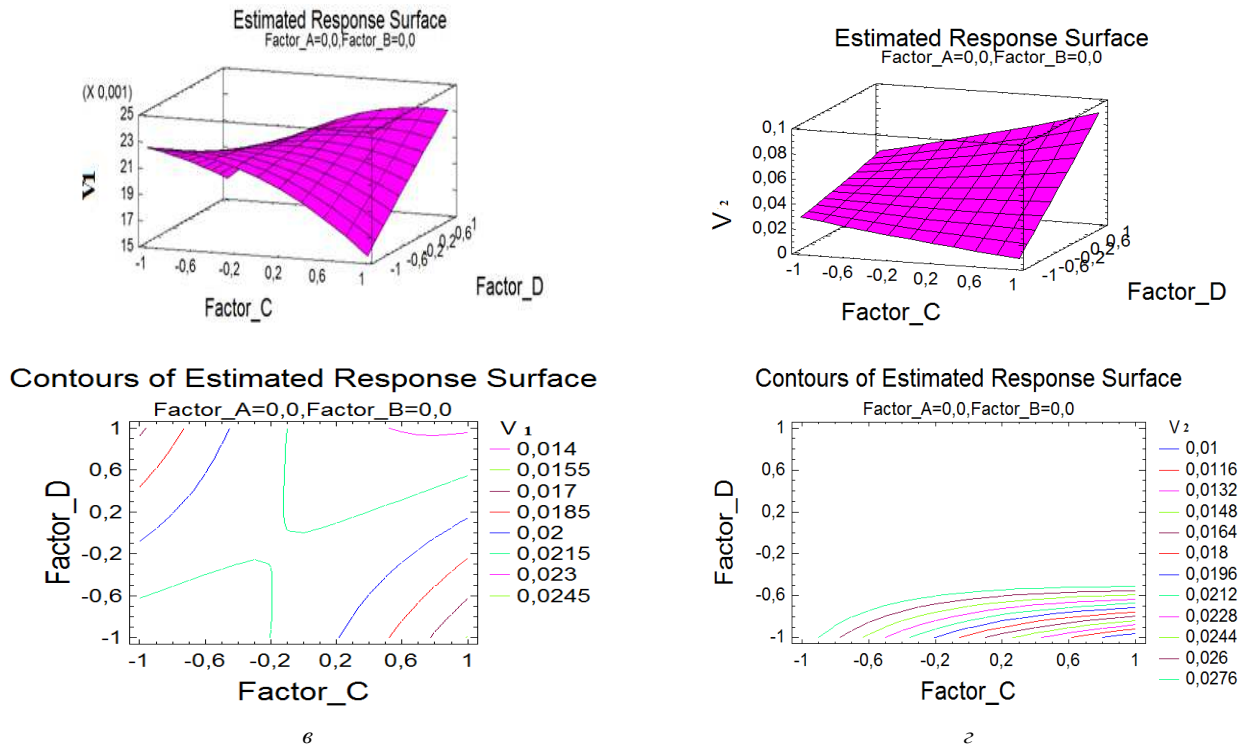


Рис. 2 – Порівняльний графічний аналіз отриманих моделей: *в* – тривимірний графік залежності швидкості корозії для сталі SAF2507 під шаром цементного покриття $V_1 = f(D, C)$ та контурний графік поверхні відгуку для факторів D і C; *з* – тривимірний графік залежності швидкості корозії для сталі Ст45 при $V_2 = f(D, C)$ та контурний графік поверхні відгуку для факторів D і C.

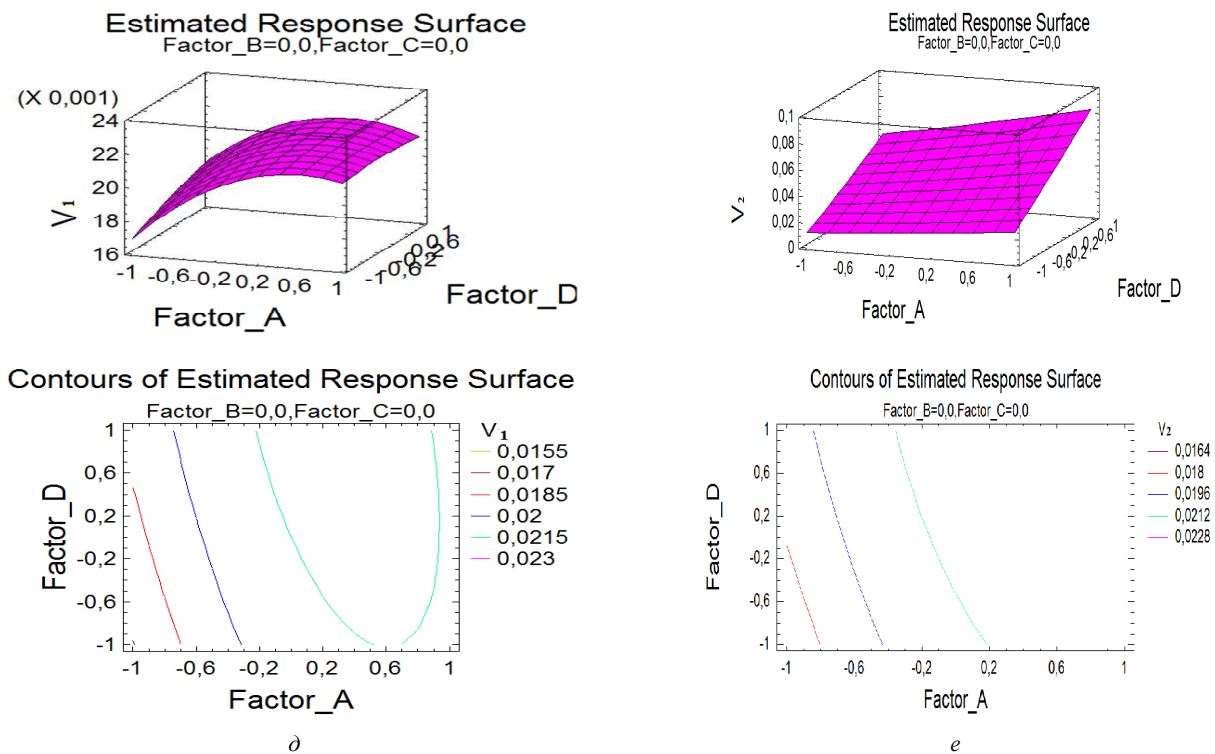


Рис. 2 – Порівняльний графічний аналіз отриманих моделей: *д* – тривимірний графік залежності швидкості корозії для сталі SAF2507 під шаром цементного покриття $V_1 = f(A, D)$ та контурний графік поверхні відгуку для факторів A і D; *е* – тривимірний графік залежності швидкості корозії для сталі Ст45 під шаром цементного покриття $V_2 = f(A, D)$ та контурний графік поверхні відгуку для факторів A і D.

Цілком закономірним для обох моделей є також значимість коефіцієнтів, відповідальних за вплив фактору (D) – вміст H_2S . Спостерігаються також і деякі відмінності в поведінці моделей: так, наприклад, значимість коефіцієнту, який відповідає за сумісний вплив факторів (B) і (D) – температури та вмісту H_2S , більш суттєва для зразка сталі Ст45 на відміну від зразка сталі SAF2507.

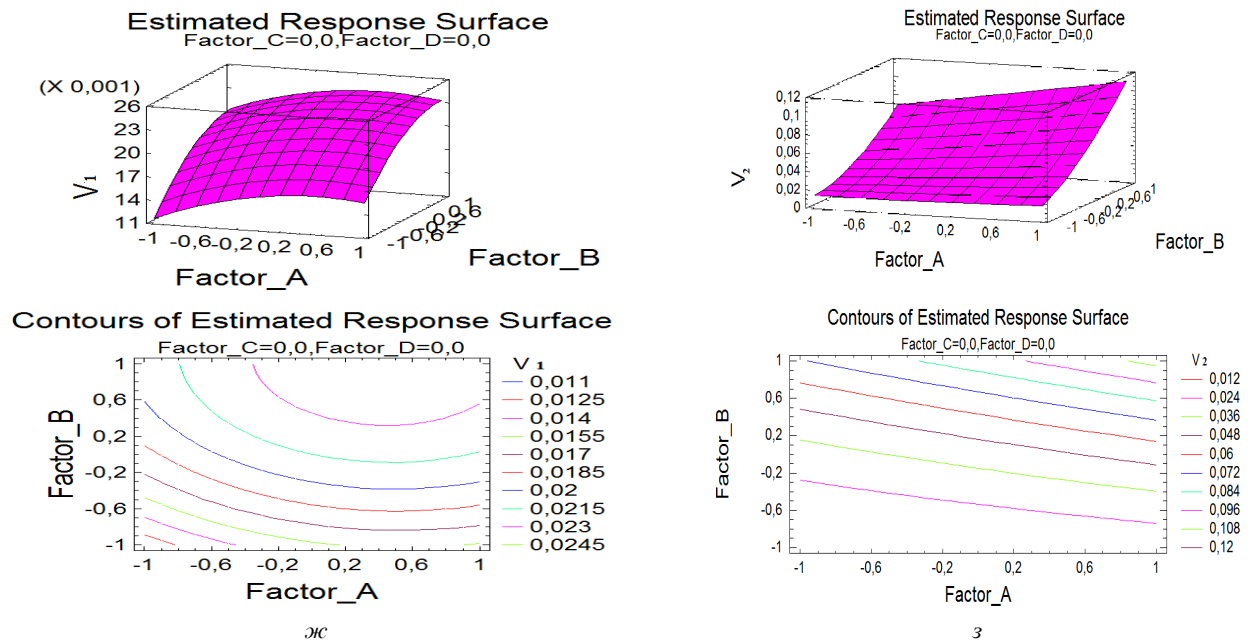


Рис. 2 – Порівняльний графічний аналіз отриманих моделей: *ж* – тривимірний графік залежності швидкості корозії для сталі SAF2507 під шаром цементного покриття $V_1 = f(A, B)$ та контурний графік поверхні відгуку для факторів A і B; *з* – тривимірний графік залежності швидкості корозії для сталі Ст45 під шаром цементного покриття $V_2 = f(A, B)$ та контурний графік поверхні відгуку для факторів A і B.

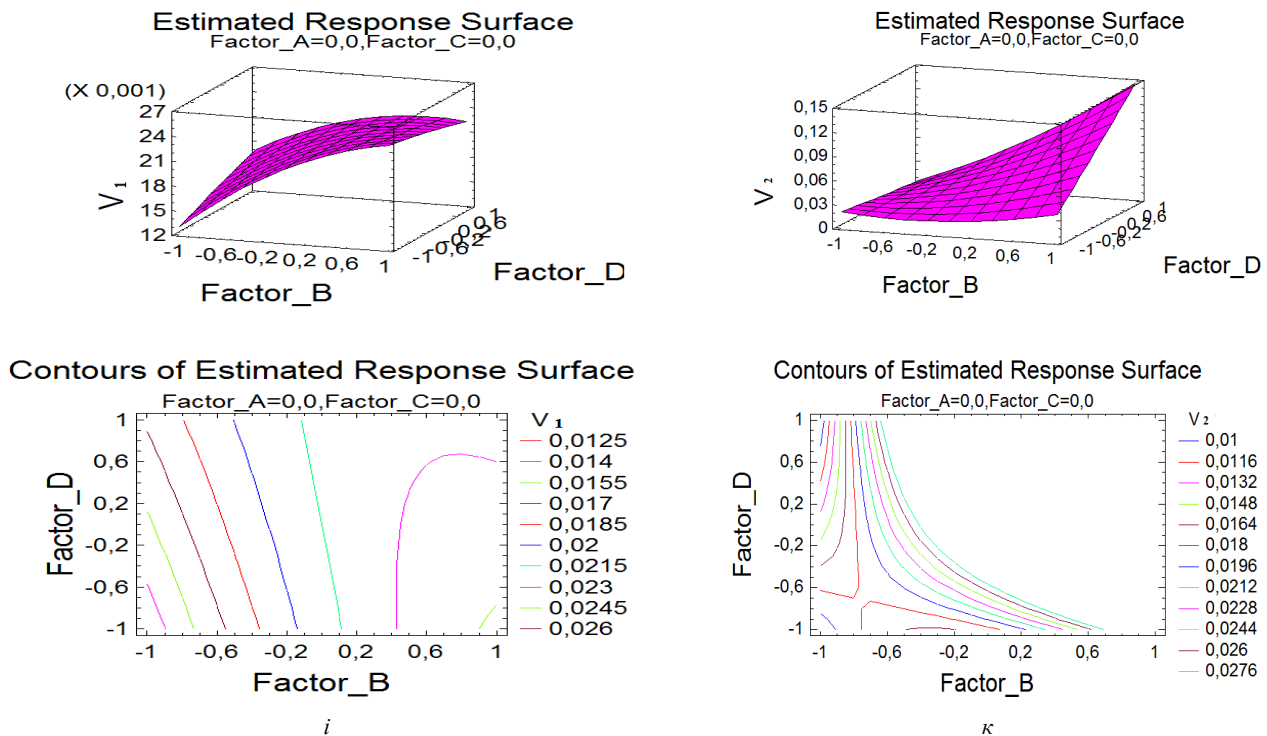


Рис. 2 – Порівняльний графічний аналіз отриманих моделей: *і* – тривимірний графік залежності швидкості корозії для сталі SAF2507 під шаром цементного покриття $V_1 = f(B, D)$ та контурний графік поверхні відгуку для факторів B і D; *к* – тривимірний графік залежності швидкості корозії для сталі Ст45 під шаром цементного покриття $V_2 = f(B, D)$ та контурний графік поверхні відгуку для факторів B і D.

На рис. 2, а – м наведені тривимірні перетини поверхні цільової функції та контурні криві цих поверхонь. Зупинимось на них докладніше.

Графічний аналіз отриманих рівнянь (рис. 2) показує, що для першої моделі (зразок сталі SAF2507) залежності $V_1 = f(C, D)$, $V_1 = f(C, A)$, $V_1 = f(A, D)$, $V_1 = f(C, B)$, $V_1 = f(B, D)$, $V_1 = f(A, B)$, мають екстремальний характер (рис. 2, а, в, д, ж, и) і існують поверхні з максимальними значеннями швидкості корозії, які треба враховувати при використанні цього матеріалу. Для зразка сталі Ст45 таких областей не спостерігається, окрім варіанту (рис. 2, к), де для залежності $V_2 = f(B, D)$ існує певний мінімум для швидкості корозії. Для зразка сталі SAF2507 при цьому (рис. 2, и) спостерігається певна оптимальна область для показника швидкості корозії з максимумом.

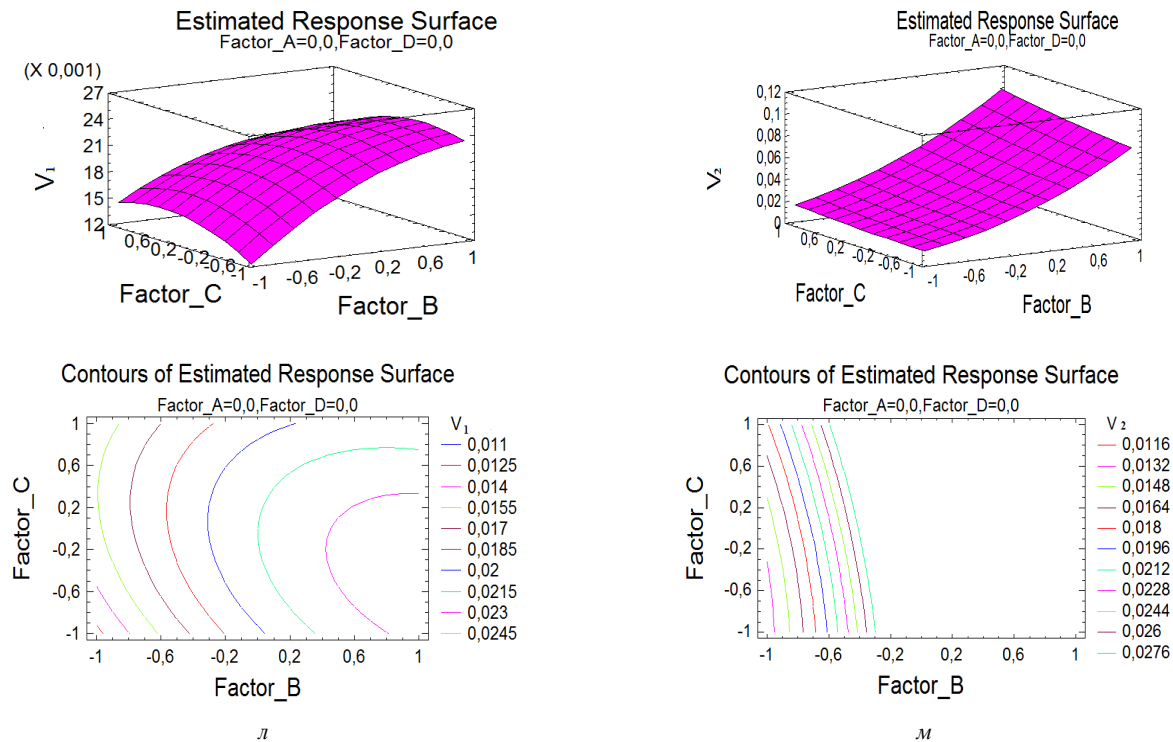


Рис. 2 – Порівняльний графічний аналіз отриманих моделей: л – тривимірний графік залежності швидкості корозії для сталі SAF2507 під шаром цементного покриття $V_1 = f(B, C)$ та контурний графік поверхні відгуку для факторів В і С; м – тривимірний графік залежності швидкості корозії для сталі Ст45 під шаром цементного покриття $V_2 = f(B, C)$ та контурний графік поверхні відгуку для факторів В і С. Кодування факторів та їх розмірність співпадає з даними табл. 2 і табл. 3.

Висновки. Таким чином, в результаті постановки експерименту з вивчення впливу покриття на основі портландцементу марки G і комплексною добавкою на основі аміновмісних компонентів на корозійну стійкість сталей Ст45 і SAF 2507 отримані рівняння регресії, які в цілому адекватно відображають залежність швидкості корозії для сталей Ст45 і SAF 2507 під шаром цементного покриття з інгібітором корозії в залежності від дії різних агресивних факторів підземного середовища: солевмісту, температури, вмісту CO_2 та вмісту H_2S , проведений їх дисперсійний і графічний аналізи.

Список літератури

1. Жирнов Р. А., Дербеньов В. А., Шкляр Р. Л. Досвід і перспективи освоєння сероводородовмісних родовищ // Газова промисловість. – 2010. – №5. – С. 29 – 33.
2. Дерзач Т. А., Проскуркин Е. В. Отечественные разработки в области производства труб нефтяного сортамента высокой коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2006. – № 3. – С. 51 – 56.
3. Нестеренко С. В. Коррозионная стойкость новых аустенитно-ферритных сталей в коксохимической промышленности // Кокс и химия. – Москва : Металлургиздат, 2020. – № 2. – С. 36 – 44.
4. Amer Jassim Al-Khafajia, Fadhil Sadoonib, Mohammed Hadi Hindia. Contribution of the Zubair source rocks to the generation and expulsion of oil to the reservoirs of the Mesopotamian Basin, Southern Iraq // Petroleum Science and Technology. – Режим доступу : <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1575869>. – Дата звертання : 25 грудня 2019.
5. Kareem Khwedim, Michael Schneider, Nawrass Ameen, Ahmed Abdulameer, Andreas Winkler The Dibdibba aquifer system at Safwan–Zubair area, southern Iraq, hydrogeology and environmental situation // Environ Earth Sci. – 2017. – 76:155. – DOI : 10.1007/s12665-017-6469-0.
6. Al-Habba Y. Q., Abdullah M. A geochemical study of hydrocarbon source rocks in Northern Iraq // Oil and Arab Cooperation Journal. – 1989. – v. 15. – P. 11 – 15.
7. Abdulaziz Abdullah al-Laboun. Stratigraphy and Hydrocarbon Potential of the Paleozoic Succession in Both Tabuk and Widyan Basins. In: Halbouty, M., Ed., *Future Petroleum Provinces of the World, American Association of Petroleum Geologists Memoir*, no. 40, pp. 373-394.

8. ИРАК. Геологическое строение, нефтегазоносность и состояние нефтегазовой промышленности, обработка и интерпретация сейсмических материалов по лицензионным блокам в южной и центральной частях Западной Пустыни, оценка прогнозных ресурсов нефти и газа // ООО «Совгеоинфо». – 2009. – 158 с.
9. Рябова Л. И. Теория и практика направленного регулирования свойств тампонажных систем, обеспечивающих качественное крепление скважин в сложных геолого-технических условиях, в том числе и агрессивных средах : Дис. д-ра техн. наук : 25.00.15. – Краснодар, 2005. – 431 с.
10. Перейма А. А. Разработка тампонажных материалов и технологических жидкостей для заканчивания и ремонта скважин в сложных горно-геологических условиях : Дис. д-ра техн. наук : 25.00.15. – Ставрополь, 2009. – 300 с.
11. Доровских И. В., Живаева В. В. Выявление закономерностей процессов разрушения скважинной цементной оболочки в условиях повышенной коррозионной активности флюида // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2009. – № 9. – С. 47 – 52.
12. Petersen J. S. Extensive water analysis in Ceiling field // Oil and gas. – 1946. – № 11. – P. 112 – 118.
13. Albertson M. L. Corrosion in high pressure gas condensate wells // Oil and gas. – 1946. – № 12. – P. 97 – 105.
14. Kennet Eilerts. Sodium chromate effective in combating corrosion in gas wells // Oil and gas. – 1946. – № 5. – P. 121. – 126.
15. Poetker R. H., Brock P. S., Huckseberg S. A. Does the inhibitor squeeze method work? // Petroleum Engineer. – 1957. – № 12. – P. 125 – 132.
16. Poetker R. H., Stone Y. D. Inhibition improve 17 % while cost dropped 50 % // Oil and gas. – 1956. – № 6. – P. 115 – 120.
17. Мавлютов М. Р., Кравцов В. М., Овчинников В. П. Анализ причин законных проявлений и пути повышения качества цементирования скважин в условиях сероводородной агрессии. Обз. инф. Сер. Бурение. – М. : ВНИО-ЕНГ, 1984. – 52 с.
18. Аззамов Ф. А. Известково-кремнеземистые тампонажные материалы для крепления скважин в условиях высоких температур и коррозионно-активных сред : Дис. ... д-ра техн. наук (25.00.15). – Уфа, 1990. – 45 с.
19. Макаренко П. П., Булатов А. И., Рябова Л. И. Сероводородная коррозия тампонажного камня в скважинах // Тр. СКО РИА. – Москва, 1996. – С. 54 – 67.
20. Аззамов Ф. А., Измухамбетов Б. С. Долговечность тампонажного камня в коррозионно-активных средах. – СПб. : ТОВ «Недра», 2005. – 318 с.
21. Перейма А. А., Петраков Ю. И., Трусов С. Б. Коррозионная стойкость цементного камня в сероводородсодержащих средах // Нефтяное хозяйство. – 1986. – № 3. – С. 29 – 32.
22. Нестеренко С. В., Донський Д. Ф., Немах А. Моделювання антикорозійного захисту матеріалу обсадної колони в лабораторних умовах // Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. – 2019. – № 21 (1346). – С. 69 – 74. doi:10.20998/2220-4784.2019.21.11.
23. Лазуткин Е. А., Квеско Н. Г. Исследование влияния природной пластовой воды на коррозию стальных труб, применяемых при строительстве и эксплуатации нефтедобывающих скважин (на примере Юрубчено-Тохомского месторождения) // Молодой учёный. – 2017. – № 16 (150). – С. 184 – 187.
24. Максютин А. В., Шангараева А. В., Султанова Д. А. Способы предотвращения солеотложения при разработке и эксплуатации залежей нефти // Журнал «Современные проблемы науки и образования». – 2015. – № 1.
25. Товажнянський Л. Л. Конструкційні металічні матеріали в хімічному і нафтогазовому машинобудуванні : учеб. посібник. – Харьков : Підручник НТУ «ХПІ», 2012. – 212 с. – ISBN 978-966-2426-48-9.
26. Білецький В. С., Смирнов В. О. Моделювання процесів переробки корисних копалин : монографія. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2013. – 304 с.

References (transliterated)

1. Zhirnov R. A., Derbenov V. A., Shklyar R. L. Dosvid i perspektyvy osvoyennya serovodorodovmisnykh rodovyskh [Experience and prospects of development of hydrogen sulphide containing deposits]. *Gazova promyslovist* [Gas industry]. 2010, no. 5, pp. 29–33.
2. Dergach T. A., Proskurkin E. V. Otechestvennyye razrabotki v oblasti proizvodstva trub neflyanogo sortamenta vysokoy korrozionnoy stoykosti i ekspluatatsionnoy nadezhnosti [Domestic developments in the field of production of oil pipes with high corrosion resistance and operational reliability]. *Metallurg. i gornorud. prom-t'* [Metallurg. and the miner. Prom.]. 2006, no. 3, pp. 51–56.
3. Nesterenko S. V. Korrozionnaya stoykost' novykh austenitno-ferritnykh staley v koksohimicheskoy promyshlennosti [Corrosion resistance of new austenitic-ferritic steels in the coke industry]. *Koks i khimiya* [Coke and chemistry]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2020, no. 2, pp. 36–44.
4. Amer Jassim Al-Khafajia, Fadhil Sadoonib, Mohammed Hadi Hindia. Contribution of the Zubair source rocks to the generation and expulsion of oil to the reservoirs of the Mesopotamian Basin, Southern Iraq. *Petroleum Science and Technology*. Available at : <https://doi.org/10.1080/10916466.2019.1575869>. (accessed 25.12.2019).
5. Kareem Khwedim, Michael Schneider, Nawrass Ameen, Ahmed Abdulameer, Andreas Winkler. The Dibdibba aquifer system at Safwan–Zubair area, southern Iraq, hydrogeology and environmental situation. *Environ Earth Sci*. 2017, 76:155. DOI : 10.1007/s12665-017-6469-0.
6. Al-Habba Y. Q., Abdullah M. A geochemical study of hydrocarbon source rocks in Northern Iraq. *Oil and Arab Cooperation Journal*. 1989, v. 15, pp. 11–15.
7. Abdulaziz Abdullah al-Laboun. Stratigraphy and Hydrocarbon Potential of the Paleozoic Succession in Both Tabuk and Widyan Basins. In: Halbouty, M., Ed., *Future Petroleum Provinces of the World, American Association of Petroleum Geologists Memoir*, no. 40, pp. 373–394.
8. Irak. Geologicheskoe stroenie, neftegazonosnost' i sostoyanie neftegazovoy promyshlennosti, obrabotka i interpretatsiya seysmicheskikh materialov po litsenzionnym blokam v yuzhnoy i tsentral'noy chastyakh Zapadnoy Pustyni, otsenka prognoznnykh resursov nefli i gaza [Iraq : Geological structure, oil and gas content and state of the oil and gas industry, processing and interpretation of seismic materials by licensed blocks in the southern and central parts of the Western Desert, estimation of oil and gas forecast resources]. *ООО "Sovgeoinfo"* [Sovgeoinfo LLC]. 2009. 158 p.
9. Ryabova L. I. *Teoriya i praktika napravlennoy regulirovaniya svoystv tamponazhnykh sistem obespechivayushchikh kachestvennoe kreplenie skvazhin v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh, v tom chisel i agresivnykh sredakh* : Dis. D-ra tekhn. nauk. (25.00.15) [Theory and practice of directional control of the properties of cementing systems, providing high-quality fastening of wells in difficult geological and technical conditions, including aggressive environments Dr. Eng. Sci. Diss. : 25.00.15]. Krasnodar, 2005. 431 p.
10. Pereyma A. A. *Razrabotka tamponazhnykh materialov i tekhnologicheskikh zhidkostey dlya zakanchivaniya i remonta skvazhin v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviyakh* : Dis. ... Dr. tekhn. nauk (25.00.15) [Development of cementing materials and process fluids for the completion and repair of wells in difficult mining and geological conditions. Dr. Eng. Sci. Diss. : 25.00.15]. Stavropol, 2009. 300 p.
11. Dorovskikh I. V., Zhivaeva V. V. Vyyavlenie zakonovnostey protsessov razrusheniya skvazhinnoy tsementnoy obolochki v usloviyakh povyshennoy korrozionnoy aktivnosti fluyda [Detection of patterns of processes of destruction of the cement shell of the well in conditions of increased corrosion activity of fluid]. *Budivnytstvo naftovykh i gazovykh sverdlonyn na sushi i na mori* [Construction of oil and gas wells on land and at sea]. 2009, no. 9, pp. 47–52.
12. Petersen J. S. Extensive water analysis in Ceiling field. *Oil and gas*. 1946, no. 11, pp. 112–118.
13. Albertson M. L. Corrosion in high pressure gas condensate wells. *Oil and gas*. 1946, no. 12, pp. 97–105.
14. Kennet Eilerts. Sodium chromate effective in combating corrosion in gas wells. *Oil and gas*. 1946, no. 5, pp. 121–126.
15. Poetker R. H., Brock P. S., Huckseberg S. A. Does the inhibitor squeeze method work? *Petroleum Engineer*. 1957, no. 12, pp. 125–132.
16. Poetker R. H., Stone Y. D. Inhibition improve 17 % while cost dropped 50 %. *Oil and gas*. 1956, no. 6, pp. 115–120.
17. Mavlyutov M. R., Kravtsov V. M., Ovchinnikov V. P. *Analiz prychyn zakononnykh proyaviv i shlyakhy pidvyshchennya yakosti tsementuvannya sverdlonyn v umovakh sirkovodnevoyi agresiyi. OBZ inf. Ser. Burinnya* [Analysis of causes of illicit manifestations and ways of improving the qual-

- ity of cementing of wells in the conditions of hydrogen sulphide aggression. OBZ. inf. Ceries Boring]. Moscow, VNIIO-ENG Publ., 1984. 52 p.
18. Agzamov F. A. *Izvestkovo-kremnezemnistye tamponazhnye materialy dlya krepleniya skvazhyn v usloviyakh vysokikh temperatur i korrozionno-aktivnykh sred* : Dis. ... Dr. tekhn. nauk (25.00.15) [Limestone-siliceous tamponage materials for mounting wells in high temperatures and corrosive environments. Dis. ... Dr. Sciences (25.00.15)]. Ufa, 1990. 45 p.
 19. Makarenko P. P., Bulatov A. I., Ryabova L. I. Serovodородnaya korroziya tamponazhnogo kamnya v skvazhinakh [Hydrogen sulphide corrosion of slurry stone in wells]. *Tr. SKO RIO* [Tr. RIA RMS]. Moscow, 1996, pp. 54–67.
 20. Agzamov F. A., Izmukhambetov B. S. *Dolgovechnost' tamponazhnogo kamnya v korrozionno-aktivnykh sredakh* [Durability of the calcining stone in corrosion-active environments]. St. Petersburg, Nedra LLC, 2005. 318 p.
 21. Pereyma A. A., Petrakov Yu. I., Rabbits S. B. Korrozionnaya stoykost' tsementnogo kamnya v serovodorodnykh sredakh [Corrosion resistance of cement stone in hydrogen sulphide environments]. *Naftove gospodarstvo* [Oil economy]. 1986, no. 3, pp. 29–32.
 22. Nesterenko S. V., Donsky D. F., Neamakh A. Modelyuvannya antykorozijnogo zakhystu materialu obsadnoyi kolony v laboratornykh umovakh [Modeling of anticorrosive protection of casing material in laboratory conditions]. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya : Innovatsiyni doslidzhennya u naukovykh robotakh studentiv* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative Research in Students' Scientific Works]. 2019, no. 21 (1346), pp. 69–74. doi: 10.20998 / 2220-4784.2019.21.11.
 23. Lazutkin E. A., Kvesko N. G. Issledovaniye vliyaniya prirodnoy plastovoy vody na korroziyu stal'nykh trub, primenyayemykh pri stroitel'stve i ekspluatatsii nefte dobyvayushchikh skvazhin (na primere Yurubcheno-Tokhomskogo mestorozhdeniya) "Molodoy uchenyy" [Investigation of the influence of natural formation water on the corrosion of steel pipes used in the construction and operation of oil wells (on the example of Yurubcheno-Tohomsky field)]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. 2017, no. 16 (150), pp. 184–187.
 24. Maksyutin A. V., Shangaraeva A. V., Sultanova D. A. Sposoby predotvrashcheniya soletozhneniya pri razrabotke i ekspluatatsii zalezhey nefi [Ways to Prevent Salt Deposition in the Development and Operation of Oil Deposits]. *Zhurnal "Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya"* [Journal of Contemporary Issues of Science and Education]. 2015, no. 1.
 25. Tovozhnyanskiy L. L. Konstruktsionnyye metallicheskiye materialy v khimicheskoy i neftegazovom mashinostroyenii : ucheb. posobie [Structural metal materials in chemical and oil and gas mechanical engineering : textbook]. Kharkov, Pidruchnyk NTU "KhPI", 2012. 212 p. ISBN 978-966-2426-48-9.
 26. Bilets'kiy V. S., Smimov V. O. Modelyuvannya protsesiv pererobky korysnykh kopalyn : Monohrafiya [Modeling of mineral processing processes : Monograph]. Donetsk : East Publishing House, 2013. 304 p.

Надійшла (received) 16.01.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Немах Амір Мохаммед Аладжмін (Немах Амир Мохаммед Аладжмин, Neamah Ameer Mohammed Alajmeen) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський Політехнічний Інститут», м. Харків; тел.: (+964) 780-750-0835; e-mail: ameernemah30@gmail.com; Orcid code: 0000-0001-5929-7847.

Донський Дмитро Федорович (Донской Дмитрий Федорович, Donsky Dmytro Fedorovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський Політехнічний Інститут», м. Харків; тел.: (095) 810-45-36; e-mail: dfdonsky@gmail.com. Orcid code: 0000-0003-3546-6110.

Нестеренко Сергій Вікторович (Нестеренко Сергей Викторович, Nesterenko Sergii Viktorovich) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків; тел.: (066) 017-32-16; e-mail: nester.hnamg@gmail.com. Orcid code: 0000-0002-2089-6786.

УДК 621.165

М. М. НЕЧУЙВИТЕР

АСПЕКТИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕПЛООВОГО СТАНУ КОРПУСІВ ЦИЛІНДРІВ ВИСОКОГО ТИСКУ ПАРОВИХ ТУРБІН В ПУСКОВИХ ТА ЗМІННИХ РЕЖИМАХ

Проведені дослідження щодо застосування методу зворотного формування температурної нерівномірності роз'ємних корпусів циліндрів парових турбін шляхом управління їх тепловим станом в пускових та змінних режимах. Виявлені критерії, а саме: температурних перепадів між ступенями; постійної різниці сумарних тангенціальних напружень від різниці тисків на стінку корпусу циліндра; температурних тангенціальних напружень при лінійному законі зміни температури по радіусу циліндра, регулювання котрих за відповідними їм програмами при пусках турбіни з різних теплових станів та роботі в змінних режимах, дозволяє стабілізувати тепловий стан корпусу циліндра. Запропоновані технічні рішення щодо підвищення техніко-економічних характеристик експлуатації парових турбін, енергоблоку.

Ключові слова: парова турбіна, корпус циліндра високого тиску, розкриття горизонтальних роз'ємів, управління тепловим станом, пускова мобільність.

М. М. НЕЧУЙВИТЕР

АСПЕКТЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ КОРПУСОВ ЦИЛИНДРОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПАРОВЫХ ТУРБИН В ПУСКОВЫХ И ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

Проведены исследования относительно применения метода обратного формирования температурной неравномерности разъемных корпусов цилиндров паровых турбин путем управления их тепловым состоянием в пусковых и переменных режимах. Определены критерии, а именно: температурных перепадов между ступенями; постоянной разницы суммарных тангенциальных напряжений от разницы давлений на стенку корпуса цилиндра; температурных тангенциальных напряжений при линейном законе изменения температуры по радиусу цилиндра, регулирование которых по соответствующим им программам при пусках турбины из различных тепловых состояний и работе в переменных режимах, позволяет стабилизировать тепловое состояние корпуса цилиндра. Предложены технические решения применительно к повышению технико-экономических характеристик эксплуатации паровых турбин, энергоблока.

Ключевые слова: паровая турбина, корпус цилиндра высокого давления, раскрытие горизонтальных разъемов, управление тепловым состоянием, пусковая мобильность.

© М. М. Нечуйвітер, 2020